IZLOŽENOST LJUDI ELEKTROMAGNETSKIM POLJIMA - ŠTO DO SADA ZNAMO?

Dragan Poljak

Sveučilište u Splitu, FESB, Hrvatska

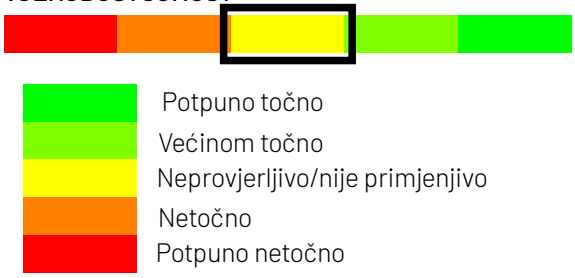
Sažetak

Ovaj rad bavi se s nekoliko aspekata izlaganja ljudi elektromagnetskim poljima iz neionizirajućeg spektra u kontekstu elektromagnetsko-toplinske dozimetrije, bioloških učinaka i nekih pravnih pitanja. Rad sadrži i kratki osvrt na osnovne mehanizme interakcije ljudi s elektromagnetskim poljima različitih frekvencija. Bilješke o biološkim učincima uslijed izlaganja i pripadajućim pravnim pitanjima također se nalaze u ovom radu.

Ključne riječi: *ljudsko izlaganje, elektromagnetska polja, elektromagnetsko-toplinska dozimetrija, biološki učinci, pravna pitanja*

Za upite: dpoljak@fesb.hr

VJERODOSTOJNOST



Uvod

Krajem 19. i početkom 20. stoljeća ljudi su dominantno bili izloženi prirodnim izvorima elektromagnetskog zračenja, npr. munje ili zračenje Sunca. Ova situacija drastično se promijenila u 20. stoljeću brzim razvojem energetskih i komunikacijskih instalacija. Na taj način ljudi su se našli u okolišu s povećavajućom razinom umjetno stvorenih električnih i magnetskih polja. Izvori takvih polja su brojni te uključuju: dalekovode, transformatorske stanice, Wi-fi usmjerivače i antene baznih stanica. Svi ovi izvori spadaju u neionizirajuće zračenje, za razliku od ionizirajućeg zračenja kao npr. ultraljubičasto (UV) zračenje. Posljedično, neke osoba može istovremeno biti izložena većem broju izvora elektromagnetskog zračenja. Posljednjih desetljeća, prisutnost umjetnog niskofrekvencijskog (LF) i visokofrekvencijskog (HF) neionizirajućeg zračenja u okolišu potaknula je kontinuirano istraživanje mogućih štetnih utjecaja na ljude [1-6]. Postavlja se pitanje: Kako opisati međudjelovanje ljudi i elektromagnetskih polja ili kako elektromagnetska polja „komuniciraju" s ljudima? Koja je priroda ove veze? Procjena izloženosti ljudi elektromagnetskim poljima multidisciplinarno je područje istraživanja koje uključuje elektromagetsko-toplinsku dozimetriju, biološke i biomedicinske učinke elektromagnetskih polja i pripadajuća pravna pitanja. Elektromagnetsko dozimetrija uključuje dozimetriju upadnog polja koja se bavi računskim i mjernim postupcima za vanjska polja raznih izvora i internu dozimetriju koja se bavi procjenom polja generiranih u ljudskom tijelu, većinom koristeći računske metode [7].

"učinci izlaganja niskofrekvencijskim poljima su živčano-mišićne stimulacije, dok je dominantni učinak visokofrekvencijskih polja na ljude grijanje tkiva"

Drugim riječima, postupak procjene izlaganja ljudi neionizirajućem zračenju odvija se u 3 koraka: 1. Određivanje razina vanjskih električnih i magnetskih polja u odsutnosti ljudskog tijela (tzv. vanjska polja). Ovo je standardna inženjerska disciplina i provodi se proračunom ili mjerenjem. 2. Kada se ljudsko tijelo nalazi blizu izvora zračenja, dio vanjskog polja ulazi u ljudsko tijelo uzrokujući neke učinke koji mogu biti toplinske i netoplinske prirode. 3. Kada se odredi distribucija unutarnjeg po-

lja u tijelu, ako se razmatra visokofrekvencijski izvor, moguće je odrediti lokalno povećanje temperature (u oku, uhu ili mozgu). Učinci izlaganja niskofrekvencijskim poljima su živčano-mišićne stimulacije, dok je dominantni učinak visokofrekvencijskih polja na ljude grijanje tkiva. Naime, pri visokim frekvencijama valna duljina upadnog polja usporediva je s dimenzijama ljudskog tijela, dijelova tijela ili pojedinih organa, a zbog rezonantnog učinka dolazi do primjetne apsorpcije elektromagnetske energije što predstavlja gustoću izvora topline u tijelu [4-5]. Na primjer, ako je čovjek visine 1,75 m izložen dalekovodu koji radi na frekvenciji f=50 Hz, odgovarajuća valna duljina je 6000 km, što nije usporedivo s dimenzijama tijela. Stoga nema učinka rezonancije niti toplinskih učinaka na tkivo. S druge strane, ako je isti čovjek izložen zračenju antene na ultra visokim frekvencijama (UHF) primjerice na f=300MHz, odgovarajuća valna duljina je 1m što je sasvim usporedivo s dimenzijama tijela. Stoga postoji jak učinak rezonancije i može dovesti do visoke razine zagrijavanja tkiva. Toplinska dozimetrija bavi se određivanjem toplinskog odziva tijela, ispitujući lokalno povišenje temperature u tkivu zbog apsorbirane elektromagnetske energije. Istraživanje bioloških učinaka bavi se vidljivim učincima na složene strukture kao što su stanice, tkiva i organi. Pravna pitanja odnose se na zakonodavstvo koje predlaže relevantne granice izloženosti.

Sprega elektromagnetskog polja i ljudskog tijela

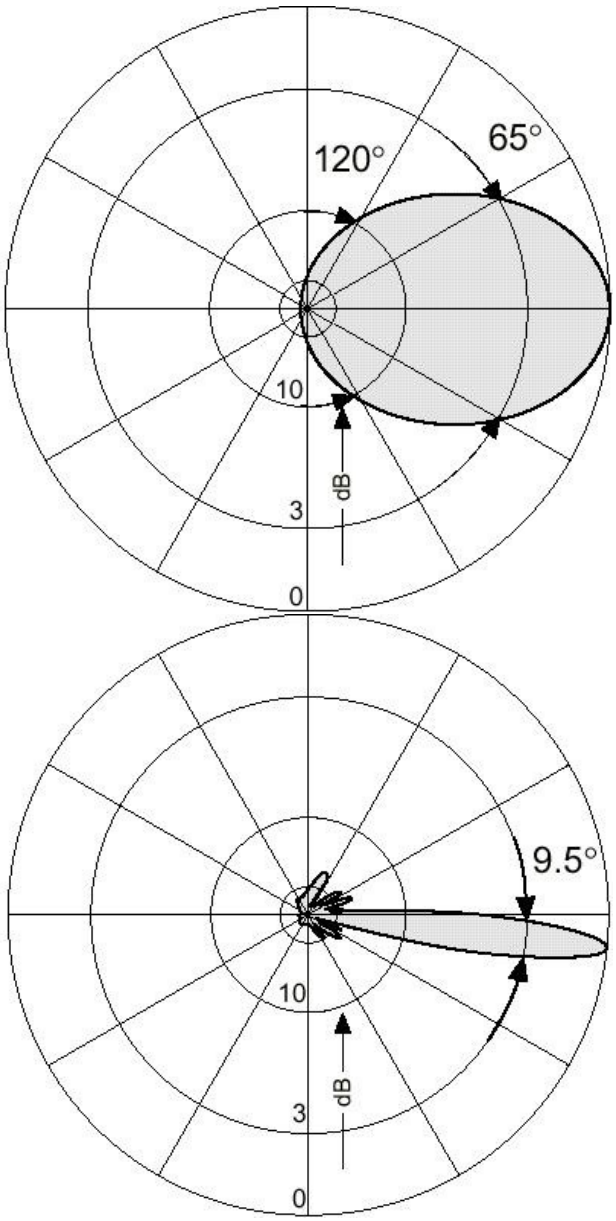
Sprega elektromagnetskih polja s biološkim sustavima obično se proučava na makroskopskoj razini kroz fenomene u obliku polarizacije vezanih naboja, orijentacije trajnih električnih dipola i gibanja prostornog naboja [1]. Na visokim frekvencijama, sprega vanjskog polja sa živim organizmima događa se putem vodljivosti iona i rotacije polarnih molekula vode, pri čemu se apsorbirana elektromagnetska energija pretvara u kinetičku energiju molekula. Općenito, postoje tri osnovna mehanizma sprege vremenski promjenjivih elektromagnetskih polja s ljudskim tijelom [1]:

- sprega s LF električnim poljima
- sprega s LF magnetskim poljima
- apsorpcija energije HF zračenja

Izloženost ljudim poljima frekvencija iznad 100 kHz može dovesti do značajne apsorpcije energije, što dovodi do lokalnog povećanja temperature. Važno je naglasiti da je apsorpcija HF energije u tijelu jako ovisna o frekvencijskom rasponu te se stoga spektar može podijeliti u 4 glavna frekvencijska pojasa [2]: 1) 100 kHz < f < 20 MHz – Apsorpcija u trupu brzo se smanjuje s povećanjem frekvencije, značajna apsorpcija javlja se u vratu i nogama 2) 20 MHz < f < 300 MHz – Relativno visoka apsorpcija može se dogoditi u cijelom tijelu, veće vrijednosti moguće su u dijelovima tijela gdje se odvijaju rezonancije, kao što je glava 3) 300 MHz < f < 6 GHz – Česte su nejednolike lokalne apsorpcije 4) f > 6 GHz – Dominantno se odvija površinska apsorpcija energije

Elektromagnetsko-toplinska dozimetrija

Očito, zbog etičkih pitanja, bilo kakvi pokusi na ljudima



Slika 1: *Horizontalni (gore) i vertikalni (dolje) dijagram zračenja za antenu Kathrein 739 634 antenna*

u režimima visokih doza zračenja ili dugotrajne izloženosti elektromagnetskim poljima nisu prihvatljivi i pokusi se provode samo na fantomima i/ili laboratorijskim životinjama. Stoga, računalni modeli koji simuliraju ljudsko tijelo izloženo elektromagnetskom zračenju od velike su važnosti. Takvi modeli zatim se implementiraju u obliku sofisticiranih računalnih simulacija s ciljem kvantificiranja te izloženosti. Ovi postupci obično se nazivaju metodama elektromagnetske dozimetrije i predstavljaju prvi nužan korak u uspostavljanju sigurnosnih smjernica i povezanih ograničenja izloženosti za ljude. Razine vanjskih polja određuju se primjenom teoretskih i/ili eksperimentalnih metoda dozimetrije upadnog polja korištenjem standardnih pristupa u inženjerskom elektromagnetizmu.

Tipični dijagram zračenja GSM antene je širok u horizontalnoj ravnini i uzak u vertikalnoj ravnini, kako je prikazano na Slici 1. Općenito, ljudi se ne bi trebali brinuti

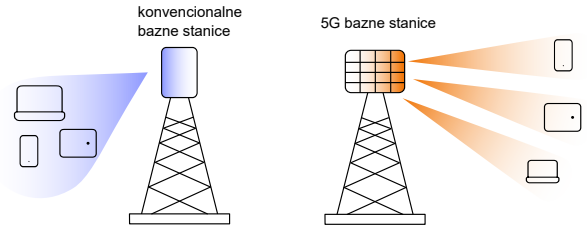
Slika 2: *Pogled na drugi sektor antenskog sustava bazne stanice*

ako je antena montirana iznad stana ili na krovu kuće jer je zračenje ispod antenskog sustava minimalno. Praktičan primjer procjene vanjskog polja odnosi se na mjerenje električnog polja koje zrači antena krovne bazne stanice u sektorskom rasporedu. Stoga je interesantna antena bazne stanice u sektorskom rasporedu montirana na vrhu krova na visini od 48 m iznad zemlje (Slika 2). Snaga zračenja po kanalu je P=955W na frekvenciji f=935MHz.

Polje izmjereno u stanu na 15. katu ispod antenskog sustava na udaljenosti od oko 8 metara od antene prilično je zanemarivo. Električno polje od E = 0,23 V/m daleko je ispod relevantnih nacionalnih granica izloženosti (16,5V/m u Hrvatskoj). i međunarodnog ograničenja (ICNIRP, 42 V/m). U današnje vrijeme zanimljivo je komentirati razliku između konvencionalnih (2G/3G/4G) i 5G baznih stanica (Slika 3).

Potreba za većom brzinom prijenosa i ukupnim mrežnim kapacitetom potaknula je primjenu milimetarskih valova za 5G mobilnu komunikaciju. Za razliku od prethodne zajedničke arhitekture bazne stanice, ova tehnologija sljedeće generacije temelji se na višekorisničkom MIMO pristupu. Potreban je veliki broj antena koje odašilju signal namijenjen samo povezanim korisnicima, no usmjeren je samo na stvarnog korisnika. Peta generacija (5G) mobilnih komunikacijskih sustava koji koriste milimetarske valove (GHz frekvencijski raspon) također je postala zanimljiva u pogledu smjernica za izloženost elektromagnetskom polju (EMF). Poznavanje vanjskog polja kojem je čovjek izložen omogućuje provođenje postupaka dozimetrije unutarnjeg polja s ciljem procjene polja induciranog u tijelu. Postoji nekoliko ključnih matematičkih relacija povezanih s apsorpcijom elektromagnetske (EM) energije i njezinim učincima na ljudsko tijelo.

Specifična stopa apsorpcije (SAR), kao osnovna dozimetrijska veličina za visokofrekvencijska polja ispod 6 GHz, mjera je brzine kojom tijelo apsorbira energiju kada je izloženo elektromagnetskom polju. Obično se izražava u vatima po kilogramu (W/kg). SAR se povećava s većom jakošću električnog polja i vodljivošću, a smanjuje s većom gustoćom tkiva.



Slika 3: *Konvencionalne i 5G bazne stanice*

Gustoća apsorbirane snage (S_{ab}), koristi se za frekvencije iznad prijelazne frekvencije od 6 GHz. Mjera je za količinu energije koja se apsorbira po jedinici površine, što je važno za procjenu lokaliziranih učinaka zagrijavanja.

Konačno, u okviru toplinske dozimetrije na višim frekvencijama, proračun lokalnog porasta temperature provodi se rješavanjem takozvane Pennesove jednadžbe prijenosa topline u biološkim tkivima. Rješavanjem ove jednadžbe dobiva se informacija kako apsorbirana elektromagnetska energija može dovesti do promjena temperature u tkivima, uzimajući u obzir provođenje topline, metaboličke procese i učinke hlađenja.

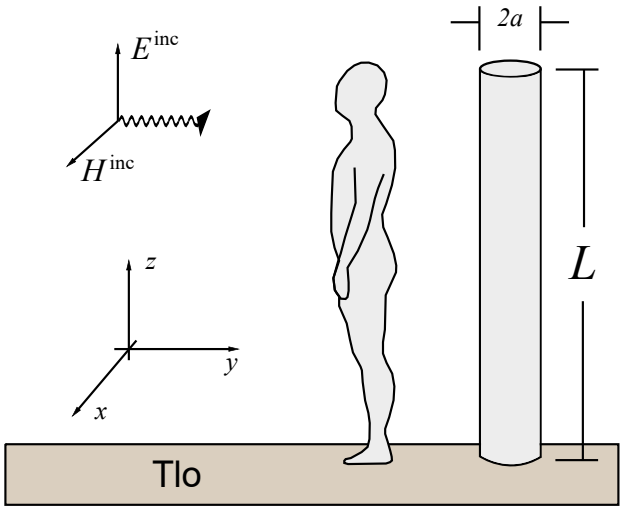
Dozimetrija se općenito može podijeliti u tri discipline: dozimetrija upadnog (vanjskog) polja, dozimetrija unutarnjeg polja i toplinska dozimetrija.

Iako ogromna matematička složenost problematike zahtijeva prilično sofisticirane računalne modele, prije samo nekoliko desetljeća (u ranoj fazi razvoja digitalnog računala) bili su dostupni samo kanonski modeli koji su koristili geometrije s visokim stupnjem simetrije kao što su cilindri, elipsoidi, diskovi i različite sferne konfiguracije (Slika 4).

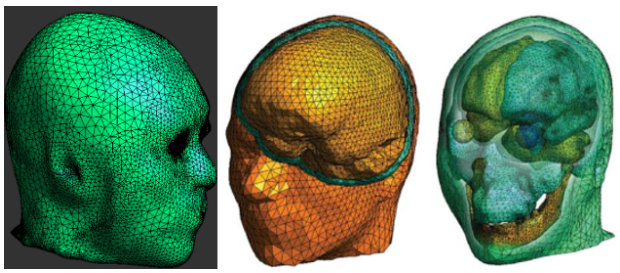
Ograničenja takvih prepojednostavljenih modela uglavnom se odnose na nisku točnost rezultata i relativno mali broj realnih scenarija za koje se takvi modeli mogu primijeniti dajući valjane i korisne rezultate. Danas, s druge strane, brzim razvojem digitalnih računala implementiraju se sofisticirane numeričke metode za proučavanje utjecaja neionizirajućeg zračenja na ljude kroz izračun induciranih polja. Stoga se realističnim, anatomski utemeljenim modelima tijela rukuje putem metoda konačne razlike (FDM), metoda konačnih elemenata (FEM), metoda momenata (MoM), metoda rubnih elemenata (BEM) ili hibridnih metoda. Ove numeričke metode daju točno modeliranje vrlo nepravilne geometrije ljudskog tijela i njegovih heterogenih električnih svojstava. Nekoliko realističnih prikaza ljudske glave prikazano je na slici 5.

U zadnje vrijeme neki kombinirani determinističko-stohastički modeli koriste se za tretiranje nesigurnosti u ulaznom skupu podataka [7].

U analizi izloženosti čovjeka poljima visoke frekvencije razmatra se izloženost cijelog tijela samo u slučajevima kada se tijelo nalazi dovoljno daleko od izvora zračenja. U takvim slučajevima moguće je uspješno koristiti prilično pojednostavljeni prikazi tijela u obliku paralelepipeda, elipsoida ili cilindra. S druge strane, ako se ljudi



Slika 4: *Jednostavni cilindrični model tijela*



Slika 5: *Realistični model ljudske glave*

nalaze u blizini polja izvora zračenja, kao što je mobilni telefon, dio tijela koji je izravno izložen takvom zračenju (glava, mozak, oko ili uho) je od interesa i potrebno ga je precizno modelirati.

Računalni primjer za unutarnju dozimetriju bavi se procjenom distribucije S_{ab} u višeslojnom modelu tkiva u odnosu na dubinu uslijed zračenja dipolne antene. Različiti slojevi tkiva različito reagiraju na elektromagnetsko zračenje. Geometrija problema prikazana je na slici 6. za slučaj troslojnog modela tkiva. S_{ab} se brzo smanjuje u odnosu na dubinu tkiva što je u skladu sa efektom kože koji je osjetno izražen na visokim frekvencijama u GHz frekvencijskom rasponu, a što odgovara milimetarskim valovima koji se koriste u 5G tehnologiji.

BIOLOŠKI UČINCI

U skladu s opisanim mehanizmima sprege, odgovarajući biološki učinci poprilično ovise o frekvenciji elektromagnetskog polja kojem je osoba izložena. U niskofrekvencijskom području biološki materijali smatraju se dobrim vodičima. Vanjska magnetska polja postavljena okomito na tijelo stvaraju zatvorene petlje električnog polja induciranog u tijelu. Na takvim frekvencijama zagrijavanje tkiva zanemarivo je jer je valna duljina signala prevelika i nije usporediva s dimenzijama tijela, kao što je već objašnjeno. S druge strane, za slučaj relativno visokih vrijednosti električnog polja postoji opasnost od stimulacije nadražljivih tkiva, tj. živaca i mišića. Inducirana električna polja zbog izloženosti tijela vanjskim električnim poljima često su zanemariva. Kod izloženosti visokim frekvencijama toplinski se učinci smatraju dominantnima. Budući da živi sustavi mogu promijeniti svoje funkcioniranje zbog značajnih promjena temperature, štetni učinci mogući su pod uvjetom da je ukupna elektromagnetska energija apsorbirana u tijelu dovoljno visoka da uzrokuje nekontrolirano povećanje temperature u tijelu, kvareći unutarnje termoregulacijske mehanizme tijela. Ukratko, biološki učinci elektromagnetskog zračenja na visokim frekvencijama mogu se klasificirati na sljedeći način [6]:

Visoki (toplinski) učinci; ako apsorbirana elektromagnetska energija uzrokuje lokalno povišenje temperature u tkivu za oko 0,1°C

Srednji (atoplinski) učinci; vidljive promjene temperature, ali poništene unutarnjim regulacijskim mehanizmima tijela

Niski (netoplinski) učinci; minimalna apsorpcija koja ne utječe značajno na fiziološke funkcije

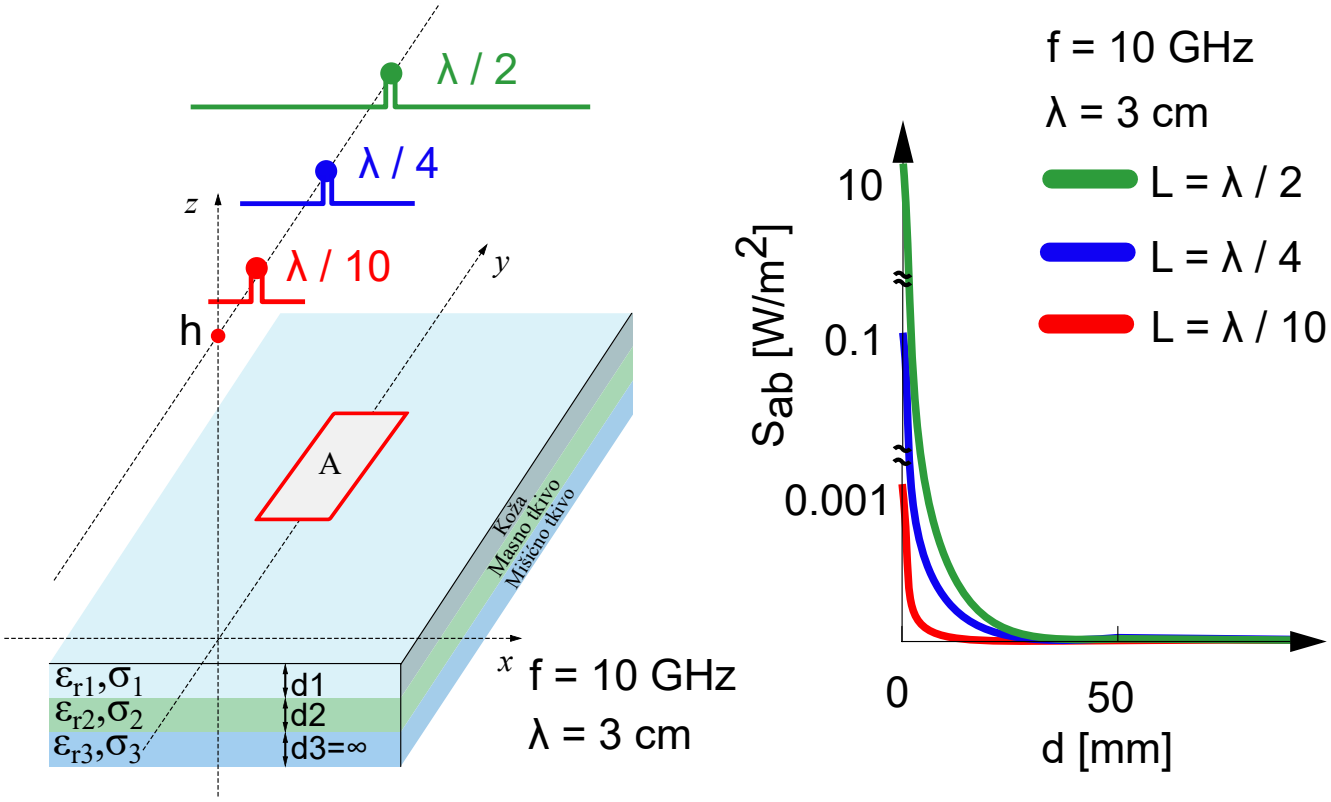
SIGURNSONE SMJERNICE

U načelu, međunarodne [1, 2] i većina nacionalnih smjernica odvojeno razmatraju radnike i opću populaciju, jer se pretpostavlja da je opća populacija ranjivija (starije osobe, djeca, trudnice, pacijenti). U skladu s mehanizmima sprege i povezanim biološkim učincima, postoje različite sigurnosne smjernice za izloženost niskim i visokim frekvencijama.

"referentna razina ne predstavlja strogu granicu iznad koje se javljaju štetni učinci na zdravlje. To je prije upozorenje da se iznad te količine potencijalni zdravstveni rizik povećava"

Nadalje, radi se o dvjema kategorijama ograničenja: referentnim razinama (ograničenja vanjskih polja) i osnovnim ograničenjima (ograničenja unutarnjih polja unutar tijela). Osnovna ograničenja su automatski zadovoljena pod uvjetom da referentne razine nisu prekoračene. S druge strane, kršenje referentnih razina ne znači automatski da su osnovna ograničenja prekoračena i potrebni su dodatni dozimetrijski postupci za provjeru mogućeg kršenja osnovnih ograničenja.

Važno je naglasiti da referentna razina ne predstavlja strogu granicu iznad koje se javljaju štetni učinci na zdravlje. To je upozorenje da se iznad te količine potencijalni zdravstveni rizik povećava. Uvijek je pitanje gdje postaviti referentnu razinu. Prema tzv. principu predostrožnosti razumno je postaviti nešto nižu razinu polja. S druge strane, ako je razina postavljena prenisko, to može biti problem za normalan rad energetskih i komunikacijskih instalacija. Do 2010. temeljni parametar za niskofrekvencijska polja bila je gustoća struje inducirana u ti-



Slika 6: *Višeslojno tkivo izloženo zračenju dipolne antene*

jelu. Od 2010. relevantna veličina je inducirano unutarnje polje.

Izloženost niskofrekvencijskim magnetskim poljima rezultira induciranim gustoćama struje i električnim poljima u obliku petlje, dok izloženost vanjskim električnim poljima ne dovodi do zatvorenih petlji u tijelu, već dovodi do aksijalnih struja koje teku kroz tijelo i završavaju u tijelu pri površinskim gustoćama naboja.

Ljudsko tijelo osjetljivo je na visokofrekvencijska polja jer su valne duljine vanjskih polja usporedive s tijelom i njegovim dijelovima. Posljedično, moguća je značajna apsorpcija elektromagnetske energije što dovodi do lokalnog povećanja temperature.

Korelacija porasta površinske temperature s gustoćom apsorbirane snage predstavlja kamen temeljac za smjernice zaštite ljudi od zračenja 5G i viših generacija komunikacijskih sustava, te za provođenje odgovarajućih bioloških/biomedicinskih istraživanja.

Zaključak

U radu se daje pregled određenih multidisciplinarnih aspekata izloženosti ljudi umjetno stvorenim elektromagnetskim poljima, čime se obuhvaća elektromagnetsko-toplinska dozimetrija, biološki učinci i pravna pitanja. Potrebno je provoditi stalna interdisciplinarna istraživanja kako bi se u potpunosti shvatio problem i ispravno razumjeli biološki učinci neionizirajućeg zračenja. Međutim, postoje i brojne biomedicinske primjene elektromagnetskih polja. Ključno je u potpunosti razumjeti ove dvostruke aspekte teme i uravnotežiti zdravstvene rizike povezane s izloženošću elektromagnetskim poljima s njihovom potencijalnom terapeutskom primjenom u medicinskom liječenju pacijenata.

IZVORI

[1] ICNIRP, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)," Health Physics 74(4):494-522; 1998.

[2] ICNIRP, "Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)," Health Physics, vol. 118, no. 5, p. 483-524, 2020.

[3] IEEE-C95.1, "IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz," IEEE, Ed. NY, USA, 2019.

[4] D. Poljak, M. Cvetković, Human Interaction with Electromagnetic Fields, St. Louis, USA: Elsevier, Academic Press, 2019.

[5] D. Poljak, A. Susnjara, L. Kraljevic, "Assessment of absorbed power density in multilayer planar model of human tissue" Radiation Protection Dosimetry, 199 (8-9), pp. 798-805, 2023.

[6] T. Saliev, D. Begimbetova, A. Masoud, B. Matkarimov, "Biological effects of non-ionizing electromagnetic fields: Two sides of a coin", Progress in Biophysics and Molecular Biology, 134 (25-36), pp. 2019.

[7] D. Poljak, A. Susnjara, Deterministic-Stochastic Modeling in Computational Electromagnetics, IEEE Press/Wiley, New Jersey, 2024.

Media press contact

Full name: Dragan Poljak

E-mail: *dpoljak@fesb.hr*